

УДК 550.388.2

А. В. Ларченко, С. В. Пильгаев, Ю. В. Федоренко

Результаты наземных наблюдений структуры поля в диапазоне очень низких частот при модификации ионосферы мощным модулированным коротковолновым излучением

A. V. Larchenko, S. V. Pilgaev, Yu. V. Fedorenko

Results of ground-based observations of the field structure in the range of very low frequencies with a strong modification of the ionosphere by a modulated short-wave radiation

Аннотация. Приведены результаты наземных наблюдений излучения ОНЧ диапазона во время нагревного эксперимента. Показано, что поляризация горизонтального магнитного поля ионосферного источника определяется условиями распространения в волноводе Земля – ионосфера и на частотах 1017 и 3017 Гц преимущественно линейна, а на частоте 2017 Гц – это эллиптическая левая. На частоте 1017 Гц распространение сигналов от ионосферного источника происходит только на ТЕМ моде, на частоте 3017 Гц присутствуют три моды: ТЕМ, ТМ01, ТЕ01. Произведена оценка фазовой скорости на частоте 1017 Гц по измеренным разностям фаз сигналов, зарегистрированных в пространственно разнесенных точках.

Abstract. The results of ground-based observations of ELF/VLF emissions during heating experiments have been described. It has been shown that the polarization of the horizontal magnetic field is determined by the propagation conditions in the Earth – ionosphere waveguide. The polarization is linear at 1017 Hz, predominantly linear at 3017 Hz, and left-handed elliptical at 2017 Hz. At the frequency of 1017 Hz waves propagate in the TEM mode only, but at the frequency of 3017 Hz waves propagate in three modes: TEM, TM01, TE01. A phase velocity at the frequency of 1017 Hz has been estimated by the measured phase differences of wavefields recorded in spatially separated points.

Ключевые слова: ОНЧ, нагревный стенд, распространение, волновод Земля – ионосфера, поляризация, мода волновода.
Key words: VLF, ionospheric heater, propagation, Earth – ionosphere waveguide, polarization, waveguide mode.

Введение

При исследовании эффектов модификации высокоширотной ионосферы большое внимание уделяется генерации электромагнитных волн ионосферными токами при воздействии на ионосферу модулированного коротковолнового (КВ) радиоизлучения, обусловленной изменением этих токов с частотой колебаний, равной частоте модуляции КВ радиоизлучения. Диапазон частот генерируемого таким образом сигнала при современных потенциалах нагревных стендов захватывает не только диапазон очень низких частот (ОНЧ), но и диапазон геомагнитных пульсаций – менее 10 Гц. Эффект генерации сигнала комбинированной частоты позволяет исследовать волноводные и резонансные свойства ионосферы и условия распространения низкочастотного излучения в волноводе Земля – ионосфера [1]. Результаты такого рода исследований могут быть использованы как для целей связи на низких частотах, так и для изучения глубинного распределения проводимости земной поверхности, что может дать сведения о ее геологической структуре.

Считается, что мощность низкочастотного источника, возникающего при модификации ионосферы мощным КВ излучением, зависит от плотности тока в ионосфере на высотах 80–100 км, которая сильно изменяется со временем. Амплитуда низкочастотных волн от такого источника, регистрируемых на земной поверхности на расстоянии в несколько длин волн от него, определяется как особенностями возбуждения волновода Земля – ионосфера источником, погруженным в ионосферу, так и условиями распространения низкочастотных волн в волноводе. Для того чтобы отделить эффекты, связанные с изменением мощности ионосферного источника, от эффектов возбуждения поля в волноводе и распространения волноводных мод, целесообразно использовать такие параметры электромагнитного поля в точке наблюдения, которые слабо зависят от мощности источника и в основном определяются физическими процессами, контролирующими возбуждение и распространение волноводных мод. Проведенные ранее эксперименты показали, что несмотря на изменение амплитуд компонент поля на порядок, поляризация горизонтального магнитного поля остается относительно стабильной. Этот факт дает возможность предположить, что такие характеристики горизонтального магнитного поля, как тип и степень поляризации, а также эксцентриситет и ориентация эллипса поляризации в основном определяются условиями распространения в волноводе, а не процессами в ионосфере.

Так как на частотах выше частоты поперечного резонанса волновода Земля – ионосфера (1.8–2.0 кГц) в волноводе могут распространяться несколько волноводных мод, обладающих разными групповыми и фазовыми скоростями и разным затуханием, для оценки модового состава необходимо измерять вертикальную электрическую E_z и две горизонтальные магнитные B_x и B_y компоненты электромагнитного поля в точках, разнесенных на расстояние 100–200 км, и анализировать фазовые соотношения между компонентами. Учитывая, что фазовая скорость распространения волноводных мод вблизи критических частот волновода Земля – ионосфера может в несколько раз превышать скорость света, такая задача требует обеспечить высокую точность синхронизации времени регистраторов с допустимой ошибкой не более нескольких микросекунд.

В данной работе приведены результаты наземных измерений локальных параметров поля ионосферного источника, образованного мощным двухчастотным КВ излучением стенда "EISCAT/Heating", в двух пространственно разнесенных точках.

Оборудование

Для непрерывной регистрации вариаций электромагнитного поля в диапазонах сверхнизких (СНЧ) и очень низких (ОНЧ) частот в Полярном геофизическом институте (ПГИ) был разработан трехкомпонентный СНЧ/ОНЧ приемник, функциональная схема которого представлена на рис. 1. Данный приемник представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из двух магнитных рамочных и вертикальной электрической антенн, предусилителей и блока, состоящего из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), микроконтроллера и GPS/GLONASS приемника. Регистратор имеет несколько модификаций, отличающихся в основном способом сохранения данных. Запись данных может производиться как на встроенную FLASH память, так и на компьютер через интерфейс Ethernet.

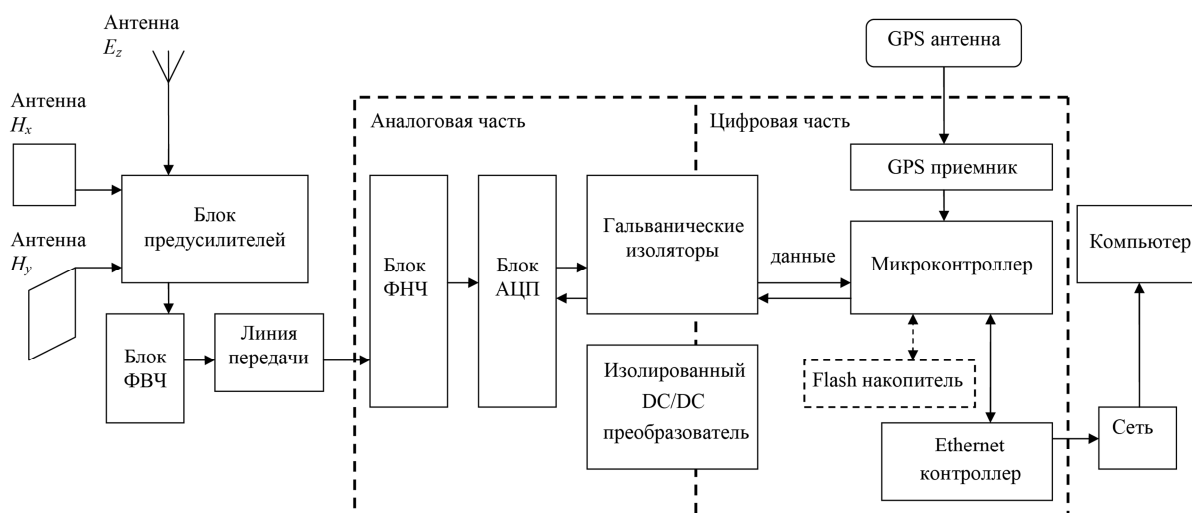


Рис. 1. Функциональная схема трехкомпонентного СНЧ/ОНЧ приемника

Антенная система. Для регистрации горизонтальных компонент магнитного поля в данном приемнике используются две ортогонально расположенные друг к другу и к поверхности земли рамочные антенны. Геометрическая форма, количество витков и размеры рамочных антенн были выбраны, исходя из соображений удобства установки и необходимой чувствительности для приема как естественных, так и искусственных СНЧ/ОНЧ сигналов. В описываемом эксперименте использовались антенны, содержащие 14 витков медного провода диаметром 0.85 мм и имеющие форму равностороннего треугольника с длиной стороны 7.5 м.

Для регистрации вертикальной компоненты электрического поля использована вертикальная электрическая антенна, которая представляет собой металлический шар диаметром 35 см, расположенный на высоте 10 м над поверхностью земли. Для ослабления влияния мелких неровностей земной поверхности и возможных локальных неоднородностей проводимости на результаты измерений вертикальной электрической компоненты поля в месте установки антенны развернута система противовесов, которые растянуты радиально от мачты антенны на длину в 3 раза больше высоты антенны.

При исследовании как естественных, так и искусственных СНЧ/ОНЧ сигналов доминирующим источником помех, наводимых на магнитные и электрическую антенны, является электромагнитное поле от местных линий электропередач. При этом гармоники сетевой помехи распространяются до нескольких кГц, а их мощность на несколько порядков выше, чем мощность регистрируемых СНЧ/ОНЧ сигналов. Благодаря высокой линейности приемника сетевая помеха и ее гармоники могут быть отслежены и вычтены при пост-обработке данных, но это возможно лишь при условии, что уровень мощности помех не приведет к перегрузке усилительного тракта.

Для минимизации воздействия сетевой помехи электрическая и магнитные антенны размещены вдали от ее источников, в то время как система сбора в стационарном варианте исполнения размещена в помещении. Предусилители расположены рядом с антеннами, что позволяет обеспечить согласование импедансов антенн и входного каскада и обеспечивает низкий уровень шума и малый уровень помех, наводимых на длинный кабель, соединяющий антенну с усилителем. Для ослабления сетевой помехи в состав предусилителей каждой из антенн входит фильтр высоких частот (ФВЧ) первого порядка с частотой среза 200 Гц. Для подавления зеркальных частот в систему сбора интегрирован блок-фильтр низких частот (ФНЧ) третьего порядка с частотой среза 15 кГц. Основное затухание сигнала на частотах выше половины частоты дискретизации обеспечивается интегрированным в микросхему АЦП AD7767 антиалиасинговым фильтром. Спектральная плотность собственных шумов антенной системы во всем частотном диапазоне 200 Гц – 14 кГц лежит как минимум на 20 дБ ниже спектральной плотности собственных шумов волновода Земля – ионосфера, приведенной в [2].

Система сбора данных. Основа системы сбора – блок АЦП с аналоговыми и цифровыми интерфейсами ввода-вывода, разработанный на базе [3]. Устройство имеет 4 аналоговых входа для приема дифференциального сигнала в диапазоне $-2.5 \dots +2.5$ В и оцифровки при помощи 24-битных аналого-цифровых преобразователей последовательного приближения с передискретизацией AD7767. Блок АЦП формирует из оцифрованных данных пакеты по 1024 Байт, с указанием необходимой информации в заголовке о процессе сбора, а завершается пакет контрольной суммой. Заголовок содержит в себе значение частоты оцифровки, временную метку, координаты станции и другие параметры текущего процесса. Размер пакета подобран с учетом того, что при этом размере достигается наибольшая скорость записи на энергонезависимую память.

Синхронизация данных со временем осуществляется посредством вставки временной метки в пакет [3; 4]. Сигнал PPS генерирует прерывание в микроконтроллере. Обработчик прерывания сбрасывает таймер микроконтроллера, отсчитывающий доли секунды. Временная метка помещается в заголовок пакета и соответствует первому байту блока данных, получаемых с АЦП после сигнала PPS. Метка представляет собой мировое время (UT), выраженное в секундах с 1/1/1970 00:00:00, получаемое по данным GPS/GLONASS (ИТ) приемника, и в долях секунд – в отсчетах таймера микроконтроллера с разрешением 1/65536000. Погрешность измерения времени в основном определяется точностью установки частоты примененного кварцевого резонатора – источника тактовой частоты микроконтроллера и стабильностью вырабатываемого приемником GPS/GLONASS Pulse-Per-Second (PPS) импульса. Максимальная общая измеренная погрешность определения времени примененных в эксперименте регистраторов не превышала 1 мкс. Оцифрованные данные передаются на компьютер через интерфейс Ethernet или на встроенную FLASH память.

Блок АЦП оцифровывает аналоговые данные с частотой до 32 кГц. Максимальная частота сигнала, которую способен зарегистрировать прибор, составляет около 15 кГц. Входящие в состав устройства 24-битные микросхемы АЦП AD7767 обеспечивают динамический диапазон до 115.5 дБ. Параллельная работа микросхем АЦП от одного тактового источника обеспечивает точное временное соответствие отсчетов между каналами.

Для уменьшения влияния помехи сети 50 Гц в случае стационарной установки приемника применяется гальваническое разделение цепей приборов и сети питания технологического помещения, где расположен компьютер. Система сбора питается от общей сети 220 В, разделенной трансформатором. Компьютер и АЦП гальванически разделены посредством интерфейса Ethernet, а внутри АЦП аналоговая часть отделена от цифровой гальваническими изоляторами ADUM3401С и изолированным преобразователем напряжения. В результате достигается минимум помех от питающей сети здания. Элементная база приемника подобрана с учетом работы в промышленном диапазоне температур от -40 до $+70$ °С.

Калибровка. Калибровка измерительных каналов магнитных компонент проводилась с помощью калибровочного тора – однослойной тороидальной катушки с воздушным сердечником. В процессе калибровки тороидальная катушка располагалась таким образом, чтобы кабели рамочных антенн проходили внутри тора. В катушку тора подавался ток известной величины и частоты. Принимая во внимание тот факт, что магнитное поле полностью сосредоточено внутри тороидальной катушки, величина магнитного потока $\Phi_{тор}$ через плоскость антенны пересчитывается в величину калибровочного однородного магнитного поля $B_{кал}$ как

$$B_{кал} = \Phi_{тор} / S_{ант},$$

где $S_{ант}$ – площадь магнитной рамочной антенны.

Полная калибровка вертикальной электрической антенны вследствие ее больших размеров практически невозможна, поэтому при помощи вспомогательной антенны, установленной вблизи основной, измеряется только фазо-частотная характеристика (ФЧХ) канала E_z и определяется форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) с точностью до постоянного коэффициента, как описано в [5]. Этих характеристик достаточно для определения направления распространения СНЧ/ОНЧ сигналов и разделения поперечной магнитной (ТМ) и поперечной электрической (ТЕ) волноводных мод. Значения постоянного коэффициента АЧХ вертикальной электрической антенны были получены в ходе описанного здесь эксперимента.

Эксперимент

В работе приводятся результаты наземных наблюдений излучения ионосферного источника, образованного в результате воздействия на ионосферу мощным амплитудно-модулированным КВ излучением стэнда "EISCAT/Heating", расположенного вблизи г. Тромсе (69° 35' 00" N, 19° 12' 42" E). Эксперимент проводился Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) с 17 по 26 октября 2014 г. КВ излучение производилось в направлении магнитного зенита с частотами модуляции: 1 017 Гц, 2 017 Гц и 3 017 Гц. Это воздействие вызвало модуляцию проводимости нижней ионосферы и образование низкочастотного ионосферного источника.

Регистрация генерируемого ионосферным источником излучения производилась двумя пространственно разнесенными СНЧ/ОНЧ приемниками: стационарный приемник установлен в обсерватории ПГИ "Ловозеро" (67° 58' 31" N, 35° 4' 52" E), мобильный приемник – в районе г. Апатиты, в точке с координатами 67° 30' 38" N, 33° 29' 36" E.

Обработка сигналов. Для исследования структуры поля ионосферного источника при обработке данных, полученных в ходе эксперимента, мы использовали поляризационную матрицу, которая обладает следующими полезными свойствами:

- она оптимальна для увеличения отношения сигнал/шум за счет усреднения по времени;
- матрица сигнала в смеси с шумом равна сумме матрицы сигнала и матрицы шума;
- при обработке нестационарных сигналов позволяет найти компромисс между статистической устойчивостью результатов и разрешением по времени.

Поляризационная матрица для трех главных компонент электромагнитного поля:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \langle H_x H_x^* \rangle & \langle H_x H_y^* \rangle & \langle H_x E_z^* \rangle \\ \langle H_y H_x^* \rangle & \langle H_y H_y^* \rangle & \langle H_y E_z^* \rangle \\ \langle E_z H_x^* \rangle & \langle E_z H_y^* \rangle & \langle E_z E_z^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{11} & J_{11} \\ J_{12}^* & J_{22} & J_{23} \\ J_{13}^* & J_{23}^* & J_{33} \end{bmatrix}.$$

Здесь H_x и H_y – северная и восточная компоненты магнитного поля, E_z – вертикальная компонента электрического поля. Угловые скобки означают усреднение по времени, * – комплексно сопряженную величину.

Для трех компонент поля можно измерить угол, который образует вектор Пойтинга \mathbf{S} с первой осью системы координат, данный угол отсчитывается от первой оси (в нашем случае это направление на север) в кратчайшем направлении на вторую ось (в нашем случае направление на восток) до вектора Пойтинга. Предполагается, что компоненты E_x , E_y и H_z малы по сравнению с H_x , H_y и E_z и ими можно пренебречь.

$$\mathbf{S} = \text{Re}[\mathbf{E}\mathbf{H}] = \text{Re} \begin{bmatrix} e_x & e_y & e_z \\ 0 & 0 & E_z \\ H_x & H_y & 0 \end{bmatrix} = \text{Re}(-e_x E_z H_y^* + e_y E_z H_x^*) = \text{Re}[-J_{23}^*, J_{13}^*, 0]^T.$$

Для расчета характеристик поляризации горизонтального магнитного поля использовались приведенные ниже формулы [6]:

$$\begin{aligned} P_c &= i(J_{21} - J_{12}); \\ P_l &= \sqrt{(J_{11} - J_{22})^2 + (J_{12} + J_{21})^2}; \\ P &= \sqrt{P_c^2 + P_l^2}; \\ \gamma &= \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{J_{21} + J_{12}}{J_{11} + J_{22}} \right), \end{aligned}$$

здесь P – средняя мощность горизонтального магнитного поля, P_l и P_c – средние квадраты поляризованных линейно и по кругу частей горизонтального магнитного поля соответственно, γ – угол между большой осью эллипса поляризации и первой осью системы координат.

Обсуждение результатов

Ниже приведены основные закономерности поведения сигналов, зарегистрированных на станциях на примере сеанса нагрева ионосферы 21 октября 2014 г. Из данных каждой станции были выбраны участки времени нагрева на частотах 1 017, 2 017 и 3 017 Гц. Каждый из этих участков преобразован узкополосным фильтром с целью выделения полезного сигнала, а также оценен шум на частотах, сдвинутых на 0.25 Гц от частоты сигнала. Элементы поляризационной матрицы были вычислены для каждого отсчета данных и затем усреднены за время цикла передатчика.

На рис. 2 приведены характеристики поляризации горизонтального магнитного поля на станциях obs. "Ловозеро" и Апатиты. Видно, что во всех случаях мощность шума значительно ниже мощности полезного сигнала. Поляризация горизонтального магнитного поля на частотах 1017 и 3017 Гц преимущественно линейна. На частоте 2017 Гц поляризация – эллиптическая левая. Этот факт дает возможность предположить, что распространение искусственного ОНЧ излучения на частотах 1017 и 3017 Гц, далеких от частоты поперечного резонанса волновода Земля – ионосфера, происходит преимущественно на поперечной электромагнитной (ТЕМ) и ТМ модах, а на частоте 2017 Гц, близкой к частоте поперечного резонанса, доминирует левополяризованная мода, хорошо отражающаяся на этой частоте от анизотропной верхней стенки волновода [7].

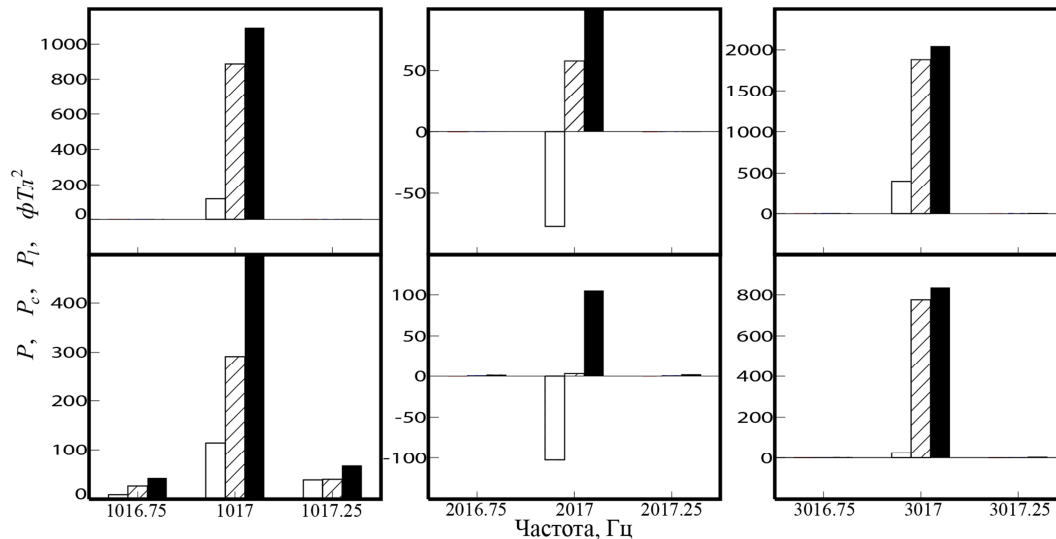


Рис. 2. Средняя мощность P (черные столбцы), линейно P_L (заштрихованные) и циркулярно P_C (белые) поляризованные части сигнала и те же величины, измеренные на частотах, отстоящих от частоты сигнала на 0.25 Гц, зарегистрированного на станциях obs. "Ловозеро" (сверху) и Апатиты (снизу)

26 октября 2014 г. нагрев ионосферы стендом "EISCAT/Heating" начался в 15 часов UT и осуществлялся циклами по 15 минут с частотами модуляции 1017, 2017 и 3017 Гц в следующем режиме: 5 минут нагрева при каждой модуляции, затем 10 минут перерыв. В 17.00 UT эксперимент был окончен.

Для детального анализа структуры поля и механизмов распространения сигнала низкочастотного источника были выбраны записи приемника obs. "Ловозеро", поскольку здесь отмечалось наибольшее соотношение сигнал/шум на всех частотах, а поляризация горизонтального магнитного поля на частотах 1017 и 3017 Гц близка к линейной. Для оценки модового состава сигналов, распространяющихся от ионосферного источника, мы преобразовали H_x и H_y компоненты поля в радиальную H_r и тангенциальную H_t компоненты, причем H_r направлена вдоль направления от источника, а H_t – перпендикулярно к H_r . Ожидается, что ТЕМ и ТМ моды образуют H_v , а ТЕ мода – H_r . Отношение $|E_z|$ к $|H_t|$ близко к волновому сопротивлению вакуума $Z_0 \approx 377$ Ом у ТЕМ моды и $120\pi \sin\theta$ Ом у ТМ моды, где θ – угол падения плоских волн, образующих ТМ моду. Для высоты отражающего слоя в ионосфере от 65 до 75 км угол падения составляет 30–45 градусов, а отношение $|E_z|$ к $|H_t|$, нормированное на Z_0 , варьируется в диапазоне значений 0.5–0.7.

Абсолютные значения вертикальной электрической компоненты поля ионосферного источника были получены исходя из предположения, что сигнал с частотой 1017 Гц распространяется в волноводе Земля – ионосфера на ТЕМ моде, т. е. отношение $|E_z|$ к $|H_t|$ сигнала данной частоты равно Z_0 . На рис. 3 представлены вертикальная электрическая, тангенциальная и радиальная магнитные компоненты сигнала, зарегистрированного в obs. "Ловозеро" во время сеанса нагрева ионосферы 26 октября 2014 г. на частотах 1017 и 3017 Гц. На рис. 4 приведены отношение $|E_z|$ к $|H_t|$ и направление вектора Пойтинга. По оси абсцисс на рисунках показано время середины каждого цикла нагрева. Во время первого цикла нагрева на частоте 3017 Гц отношение сигнал/шум оказалось недостаточным для вычисления величины $|E_z| / |H_t|$ и направления вектора Пойтинга.

Из рисунков, демонстрирующих поведение направления вектора Пойтинга и отношения $|E_z|$ к $|H_t|$ сигнала ионосферного источника на частоте 1017 Гц, лежащей ниже частоты поперечного резонанса волновода Земля – ионосфера, видно, что $|E_z|$ к $|H_t|$ близко к ожидаемому, а отклонение угла S от обратного азимута ионосферного источника мало и может быть объяснено ошибками измерений. Можно предположить, что сигнал ионосферного источника на данной частоте распространяется исключительно на ТЕМ моде, а ТЕ и ТМ моды на этой частоте являются запределными. В пользу этого предположения свидетельствует линейная

поляризация сигнала, постоянное в течение двух часов отношение $|E_z|$ к $|H_t|$ и отсутствие радиальной компоненты магнитного поля.

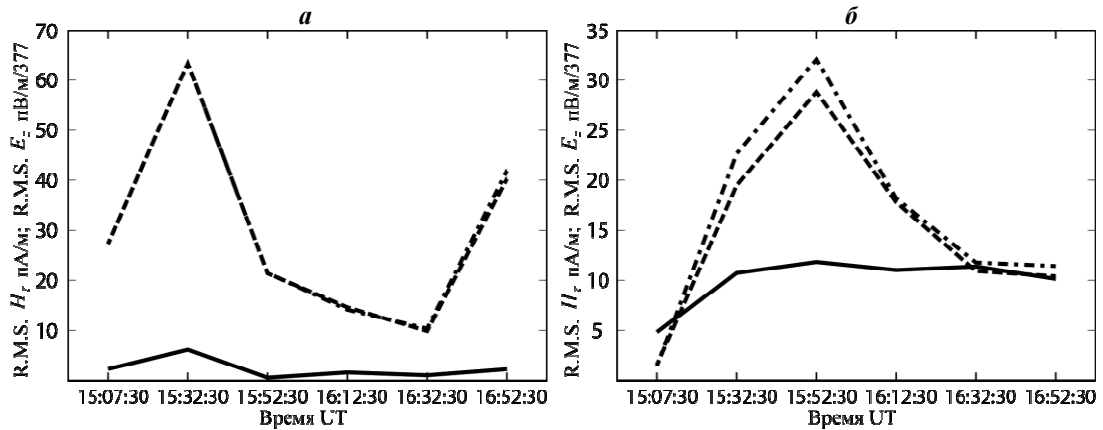


Рис. 3. R.M.S. вертикальной электрической (штриховая линия), тангенциальной (штрихпунктирная линия) и радиальной (сплошная линия) магнитных компонент на частотах 1017 (а) и 3017 (б) Гц

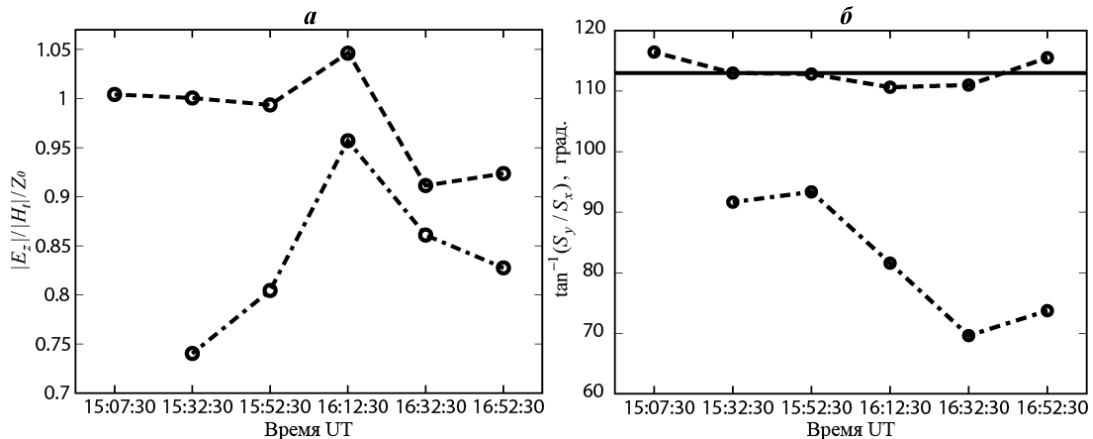


Рис. 4. Отношение $|E_z|$ к $|H_t|/Z_0$ (а) и направление вектора Пойтинга (б) на частотах 1017 Гц (штриховая линия) и 3017 Гц (штрихпунктирная линия). Сплошная линия показывает обратный азимут нагревного стнда

Иная картина наблюдается на частоте 3017 Гц, где могут сосуществовать три моды: TEM, TE01 и TM01. Радиальная компонента магнитного поля на этой частоте значительно больше, чем на частоте 1017 Гц. Величина $|E_z|/|H_t|/Z_0$ меньше, чем на 1017 Гц, но все же больше ожидаемых для TM моды значений 0.5–0.7, по-видимому, из-за преобладающего вклада TEM моды в H_t по сравнению с TM. Из-за вклада TE моды направление вектора Пойнтинга не совпадает с обратным азимутом источника, отличаясь от него примерно на 20–40 градусов.

Благодаря точной синхронизации данных, полученных с помощью представленного здесь СНЧ/ОНЧ приемника, авторами произведены оценки разности фаз сигналов ионосферного источника, зарегистрированных на станциях obs. "Ловозеро" и Апатиты [8]. Результаты измерения разности фаз на частоте 1017 Гц оказались достаточно близкими к ожидаемым в рамках модели волноводного распространения. На частотах 2017 и 3017 Гц разности фаз значимо отклоняются от ожидаемых. Авторы предполагают, что это связано с частичным распространением сигнала в ионосфере.

Заключение

Проведенный анализ структуры поля искусственного ионосферного источника позволил подтвердить и уточнить имеющиеся сведения о возбуждении и распространении низкочастотных электромагнитных сигналов в волноводе Земля – ионосфера. Показано, что на частоте 1017 Гц сигнал ионосферного источника распространяется только на TEM моде, в то время как на частоте 3017 Гц сигнал имеет многомодовый состав. Оценка направления прихода электромагнитных волн на частотах выше частоты поперечного резонанса Земля – ионосфера из-за вклада TE моды не совпадает с направлением от источника, что заставляет с осторожностью относиться к оценкам углов прихода при анализе естественных ОНЧ излучений.

Сложная волновая картина на частотах 2017 и 3017 Гц, связанная с возбуждением волновода Земля – ионосфера, требует учета характеристик верхней и нижней стенок волновода при интерпретации измеренных разностей фаз на этих частотах. Оценка фазовой скорости на частоте 1017 Гц по измеренным разностям фаз сигналов, зарегистрированных в Ловозеро и Апатитах, дает величину около 285 тыс. км/с, что не противоречит имеющимся в литературе сведениям.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Н. Ф. Благовещенской и М. Т. Rietveld за помощь в выполнении работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00293.

Библиографический список

1. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением / В. Л. Фролов, Н. В. Бахметьева, В. В. Беликович [и др.] // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 7. С. 330–340.
2. Natural Noise Fields at 1 cps to 100 kc / E. L. Maxwell, D. L. Stone // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1963. № 11 (3). P. 339–343.
3. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь / М. В. Филатов, С. В. Пильгаев, Ю. В. Федоренко // Приборы и техника эксперимента. 2011. Т. 3. С. 73–75.
4. Универсальное устройство синхронизации данных от GPS приемника / С. В. Пильгаев, О. И. Ахметов, М. В. Филатов, Ю. В. Федоренко // Приборы и техника эксперимента. 2008. Т. 3. С. 175–176.
5. Трехкомпонентные измерения структуры электромагнитного поля в диапазоне крайне низких и сверхнизких частот / А. В. Ларченко, О. М. Лебедь, Ю. В. Федоренко // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 7. С. 793–801.
6. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы / С. М. Рытов. М.: Наука, 1976. С. 351–359.
7. Polarization of ELF waves generated during "beat-wave" heating experiment near cutoff frequency of the Earth – ionosphere waveguide // Yu. Fedorenko, E. Tereshchenko, S. Pilgaev [et al.] // Radio Science. 2014. V. 49, Iss. 12. P. 1254–1264.
8. Методика измерений фаз гармонических сигналов на сети геофизических станций / О. М. Лебедь, С. В. Пильгаев, Ю. В. Федоренко // Вестник КНЦ РАН. 2010. № 2. С. 72–75.

References

1. Modifikatsiya ionosfery Zemli moschnym korotkovolnovym radioizlucheniem [Modification of the Earth's ionosphere by powerful HF radio waves] / V. L. Frolov, N. V. Bahmeteva, V. V. Belikovich [i dr.] // Uspеhi fizicheskikh nauk. 2007. V. 177, N 7. P. 330–340.
2. Natural Noise Fields at 1 cps to 100 kc / E. L. Maxwell, D. L. Stone // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1963. N 11 (3). P. 339–343.
3. Chetyrehkanalnyi 24-razryadnyi sinhronizirovannyi s mirovym vremenem analogo-tsifrovoy preobrazovatel [A four-channel 24-bit analog-to-digital converter synchronized with the universal time] / M. V. Filatov, S. V. Pilgaev, Yu. V. Fedorenko // Pribory i tehnika eksperimenta. 2011. V. 3. P. 73–75.
4. Universalnoe ustroystvo sinhronizatsii dannyh ot GPS priemnika [Universal device for synchronizing data from the GPS receiver] / S. V. Pilgaev, O. I. Ahmetov, M. V. Filatov, Yu. V. Fedorenko // Pribory i tehnika eksperimenta. 2008. V. 3. P. 175–176.
5. Trehkomponentnye izmereniya struktury elektromagnitnogo polya v diapazone krayne nizkih i sverhnizkih chastot [Three component structure of the electromagnetic field measurement in the range of VLF and ULF] / A. V. Larchenko, O. M. Lebed, Yu. V. Fedorenko // Radiotekhnika i elektronika. 2015. V. 60, N 7. P. 793–801.
6. Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch. 1. Sluchaynye protsessy [Introduction to Statistical Radiophysics. Part 1. Random Processes] / S. M. Rytov. M.: Nauka, 1976. P. 351–359.
7. Polarization of ELF waves generated during "beat-wave" heating experiment near cutoff frequency of the Earth – ionosphere waveguide // Yu. Fedorenko, E. Tereshchenko, S. Pilgaev [et al.] // Radio Science. 2014. V. 49, Iss. 12. P. 1254–1264.
8. Metodika izmereniy faz garmonicheskikh signalov na seti geofizicheskikh stantsiy [Technique to measure the phase of harmonic signals at the geophysical stations network] / O. M. Lebed, S. V. Pilgaev, Yu. V. Fedorenko // Vestnik KNTs RAN. 2010. N 2. P. 72–75.

Сведения об авторах

Ларченко Алексей Викторович – Полярный геофизический институт, мл. науч. сотрудник;
e-mail: alexey.larchenko@gmail.com

Larchenko A. V. – Polar Geophysical Institute, Junior Researcher;
e-mail: alexey.larchenko@gmail.com

Федоренко Юрий Валентинович – Полярный геофизический институт, канд. физ.-мат. наук;
e-mail: yury.fedorenko@gmail.com

Fedorenko Yu. V. – Polar Geophysical Institute, Cand. of Phys.-Math. Sci.;
e-mail: yury.fedorenko@gmail.com

Пильгаев Сергей Васильевич – Полярный геофизический институт, мл. науч. сотрудник;
e-mail: pilgaev@pgia.ru

Pilgaev S. V. – Polar Geophysical Institute, Junior Researcher;
e-mail: pilgaev@pgia.ru